

第八章 数模和模数转换

东南大学电气工程学院
明昊

8.1 概述

教学要求

- (1) 掌握DAC和ADC的定义及应用
- (2) 理解DAC的组成、倒T型电阻网络、集成D/A转换器、转换精度及转换速度
- (3) 理解ADC组成、逐次逼近型A/D转换器、积分型A/D转换器、转换精度及转换速度

2

数字电路的特点

与模拟电路相比，数字电路具有如下显著特点：

➤ 电路定义：

电路的结构以二值（0-1）数字逻辑为基础；
处理的信号为离散数字信号；
电路中电子器件工作在开关状态

➤ 基本电路结构：

结构简单，由与、或、非门等组成
大规模集成、功耗低、可靠性高、不用调试

4

数字电路的特点

与模拟电路相比，数字电路具有如下显著特点：

➤ 数据状态：

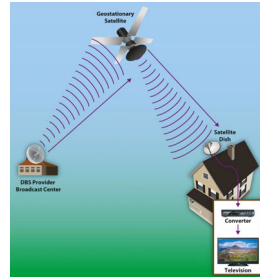
数据为0-1状态，便于存储、传输与处理

存储：光盘/U盘数据；

传输：数字电视/卫星信号

处理：通信检错、纠错

➤ 应用更为广泛（数字化设备）



5

模-数与数-模转换

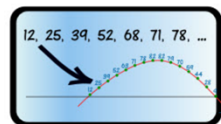
模 - 数转换 (A/D转换)：将模拟信号转换为数字信号。实现A/D转换的电路称为A/D转换器，简称为ADC(Analog-Digital Converter)

数 - 模转换 (D/A转换)：将数字信号转换为模拟信号。实现D/A转换的电路称为D/A转换器，简称为DAC(Digital-Analog Converter)

7

模拟量与数字量的相互转化

Digital becomes Analog



Digital Pictures

A similar thing happens when you take a picture.

Light (which is analog) gets projected onto a grid of millions of little sensors inside the camera:



The camera measures the light at each point and produces numbers.

6

模拟电路与数字电路

D/A 转换器

电流求和型：

- 产生一组支路电流，与二进制权重成正比
- 数字量输入时，将取值为“1”的支路电流相加，再通过电阻转换为电压

分压器型：

- 用输入数字量的每一位控制分压器的开关
- 有权电阻与权电容分压器等

8

模拟电路与数字电路

A/D转换器

直接A/D型:

- 输入的数字信号被直接转换为数字信号
- 并联比较型A/D转换器与逐次逼近型A/D转换器

间接A/D型:

- 输入的数字信号转换为某种中间变量（例如时间、频率等）再进行转换
- 双积分型（电平的时间宽度）、V-F（频率成正比）

9

8.2 D/A转换器

模-数与数-模转换

- 为了保证数据处理结果的准确性，A/D转换器和D/A转换器必须有足够的转换精度。
- 同时为了适应快速过程的控制和检测需要，A/D转换器和D/A转换器必须有足够的转换速度。
- 因此，**转换精度**和**转换速度**是衡量A/D转换器和D/A转换器性能优劣的主要标志。

10

D/A转换器

将数字信号转换为模拟信号的电路。

例如：对于0 ~ 5V的直流电压，计算机用8位数字量来描述时：

最小值（00000000）B = 0 对应 **0V**，

最大值（11111111）B = 255 对应 **5V**，

中间值（01111111）B = 127 对应 **2.5V** 等

D/A的任务是接收到一个数字量后，给出一个相应的电压。比如收到（00111111）B，应给出幅度为**1.25V**的电压。

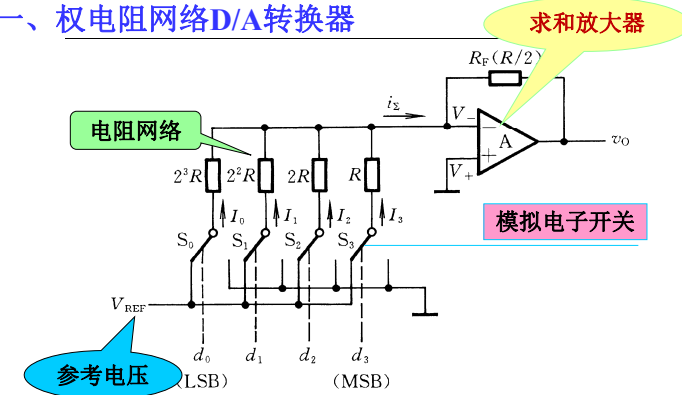
12

01 权电阻网络D/A转换器

13

权电阻网络D/A转换器

一、权电阻网络D/A转换器



15

二进制“权”的概念

- 二进制数中，每一位有0和1两个数码，计数的**基数是2**
- 根据幂级数展开公式，二进制数可以展开为

$$D = \sum_i k_i \times 2^i$$

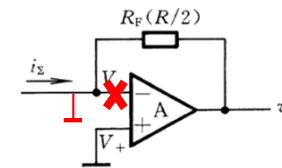
因此，二进制中第*i*位“1”的权实际上是 2^i 。



14

权电阻网络D/A转换器

一、权电阻网络D/A转换器



- 对于求和放大器，其本质为接成负反馈的运算放大器
- 理想运算放大器开环放大倍数为无穷大，且输入电流为0（**虚断**）
- 当 $V_- > V_+$ 时， V_o 为很大的负电压，由于负反馈电阻 R_F 使得 V_- 电压迅速下降，反之也成立
- 因此，运算放大器端电压 $V_- \approx V_+$ （**虚短**），在本电路中为0V

16

权电阻网络D/A转换器

集成运放通过 R_F 接入负反馈，有虚短， $V_- \approx V_+ = 0$

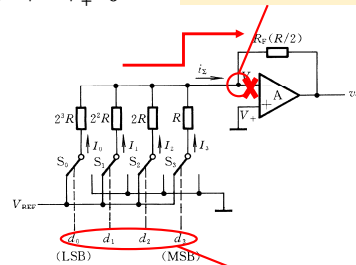
电压 V_- 接近0

$$v_o = -R_F i_\Sigma = -R_F (I_3 + I_2 + I_1 + I_0)$$

$$I_3 = \frac{V_{REF}}{R} d_3 \quad I_2 = \frac{V_{REF}}{2R} d_2$$

$$I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1 \quad I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0$$

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$



17

02

倒T形电阻网络D/A转换器

19

权电阻网络D/A转换器

n 位权电阻网络D/A转换器，当反馈电阻取为 $R/2$ 时，输出电压的计算公式：

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1} 2^{n-1} + d_{n-2} 2^{n-2} + \dots + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

输出电压的变化范围： $0 \sim -\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$

优点：结构简单，所用的电阻元件数很少。

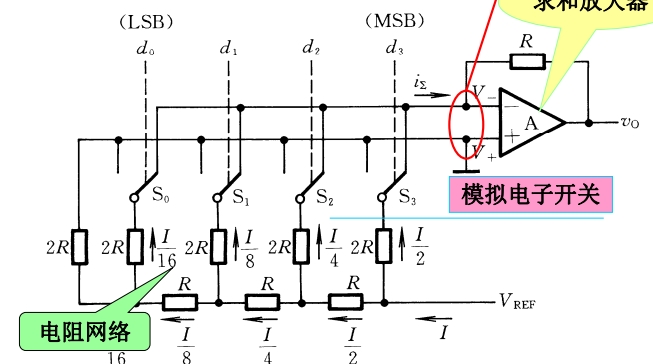
缺点：各电阻的阻值相差较大，不能保证有很高的精度。

18

倒T型电阻网络D/A转换器

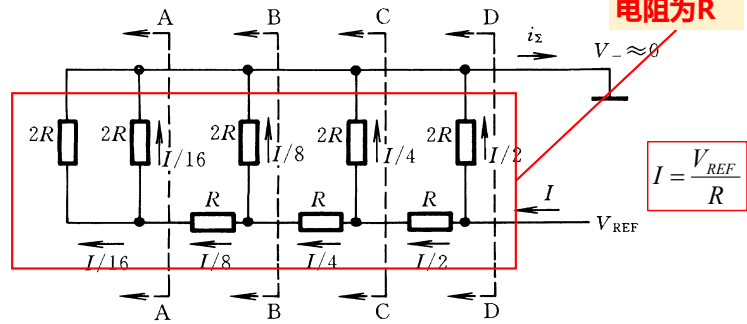
所有电阻均为
接地状态

二、倒T形电阻网络D/A转换器



20

倒T型电阻网络D/A转换器



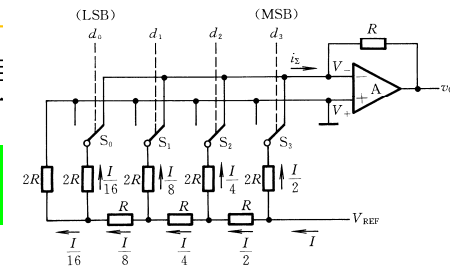
由于 $V_- \approx V_+ = 0$, 所以开关S合到哪一边, 都相当于接到了“地”电位, 流过每条电路的电流始终不变。

21

倒T型电阻网络D/A转换器

n 位输入的倒T形电阻取为 R 时, 输出电压的计

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1} 2^{n-1} +$$

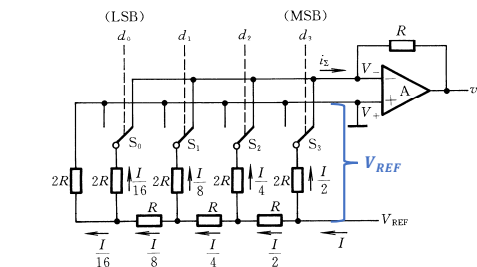


优点:

- (1) 只有 R 和 $2R$ 两种阻值的电阻, 可达到较高的精度;
- (2) 各支路电流恒定不变, 在开关状态变化时, 不需电流建立时间, 所以电路转换速度快, 使用广泛。

23

倒T型电阻网络D/A转换器

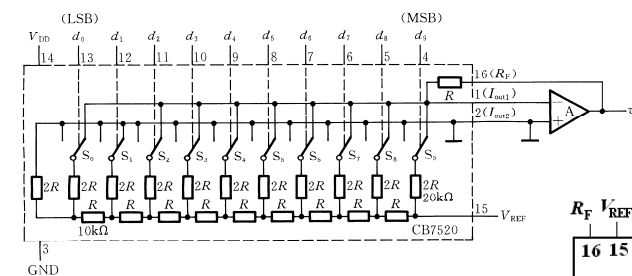


$$i_\Sigma = \frac{I}{2} d_3 + \frac{I}{4} d_2 + \frac{I}{8} d_1 + \frac{I}{16} d_0 \quad \text{取 } R_F = R \quad I = \frac{V_{REF}}{R}$$

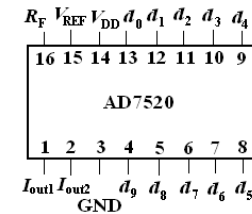
$$v_o = -R i_\Sigma = -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

22

倒T型电阻网络D/A转换器



AD7520电路原理图



倒T型电阻网络D/A转换器

参考电压输入端

电源输入端

内置反馈电阻输入端

接运放反相端

一般接地

8位数字量输入端

AD7520

$$V_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_12^1 + d_02^0)$$

25

03 权电流型D/A转换器

27

两类典型接法

内置反馈电阻

外接反馈电阻

AD7520

$$V_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

$$V_o = -\frac{R_F}{R} \frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

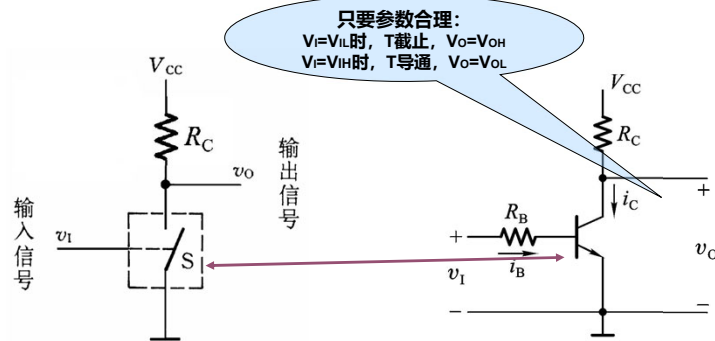
26

权电流型D/A转换器

恒电流源

28

回想一下TTL三极管的物理特性



29 29

双极型三极管的基本开关电路

工作状态分析：

(3) 当 V_i 继续上升， i_B 继续上升， V_o 继续下降。

当 R_C 上压降接近于 V_{CC} 时， $V_o \approx 0$ 。

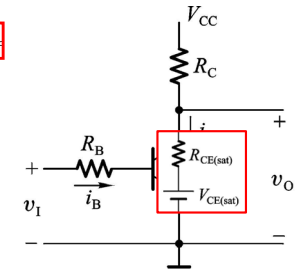
三极管工作在深饱和状态 $V_o = V_{OL} = V_{CE(sat)} \approx 0$ 。

深度饱和时的基极电流为：

$$I_{BS} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{\beta(R_C + R_{CE(sat)})}$$

为了使三极管处于饱和工作状态，必须保证 $i_B > I_{BS}$

$$\text{电压放大倍数: } A_v = -\frac{\Delta v_o}{\Delta v_i}$$



31 31

回想一下TTL三极管的物理特性

工作状态分析：

(2) 当 V_i 上升至 $> V_{ON}$ 后，有 i_B 产生， $i_B = \frac{V_i - V_{ON}}{R_B}$ ，并有对应的 $i_C = \beta i_B$ 流过 R_C 。

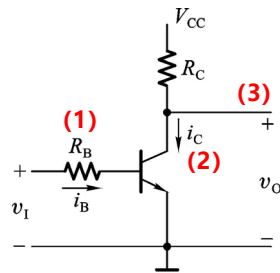
于是得到 $V_o = V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - \beta i_B R_C$ 。

所以 $V_i \uparrow \rightarrow i_B \uparrow \rightarrow i_C \uparrow \rightarrow V_o \downarrow$ ，三极管工作在放大区

$$A_v = -\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}$$

先计算 i_B ，再通过放大倍数
计算 i_C 以及电压

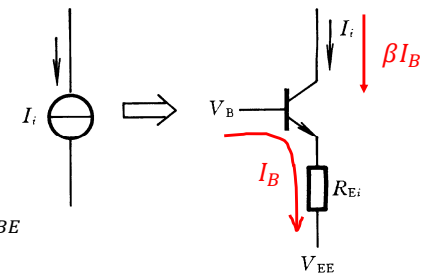
此时输入电压与输出电压
的趋势关系是？



30 30

权电流型D/A转换器

恒流源模型：



$$(1 + \beta)I_B R_{Ei} = V_B - V_{EE} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{(1 + \beta)R_{Ei}}$$

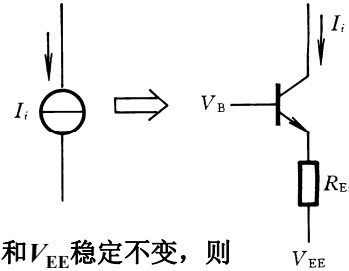
$$I_i = \beta I_B = \frac{\beta(V_B - V_{EE} - V_{BE})}{(1 + \beta)R_{Ei}} \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$

32

权电流型D/A转换器

恒流源模型：

$$I_i \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$



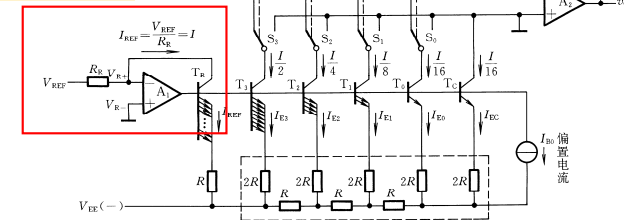
只要电路工作时保证 V_B 和 V_{EE} 稳定不变，则三极管的集电极电流即可保持恒定，不受开关内阻的影响。

33

权电流型D/A转换器

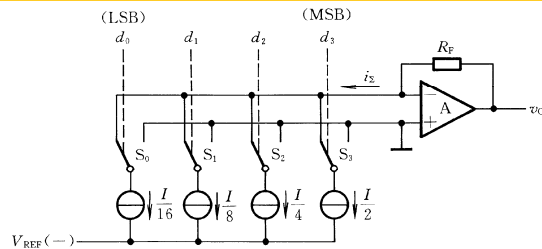
为减少电阻阻值的种类，在实用的权电流型D/A转换器中，经常利用倒T形电阻网络的分流作用产生一组所需的恒流源。

基准电流发生电路



35

权电流型D/A转换器



$$\begin{aligned} v_o &= i_o R_F \\ &= R_F \left(\frac{I}{2} d_3 + \frac{I}{2^2} d_2 + \frac{I}{2^3} d_1 + \frac{I}{2^4} d_0 \right) \\ &= \frac{R_F I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) \end{aligned}$$

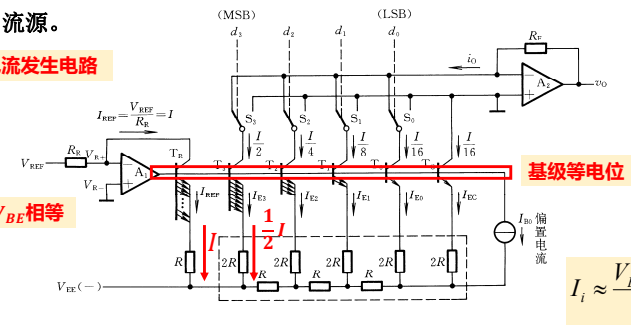
34

权电流型D/A转换器

为减少电阻阻值的种类，在实用的权电流型D/A转换器中，经常利用倒T形电阻网络的分流作用产生一组所需的恒流源。

基准电流发生电路

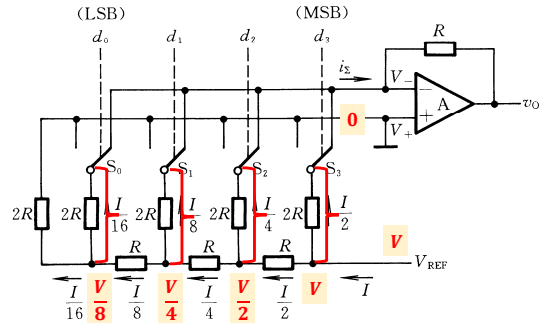
假设 V_{BE} 相等



$$I_i \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$

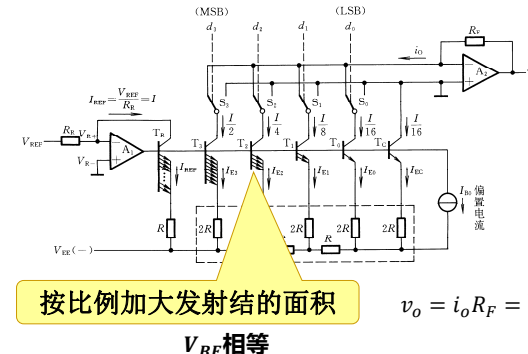
36

回想一下倒T型网络的电压分布情况...



37

权电流型D/A转换器



按比例加大发射结的面积

V_{BE} 相等

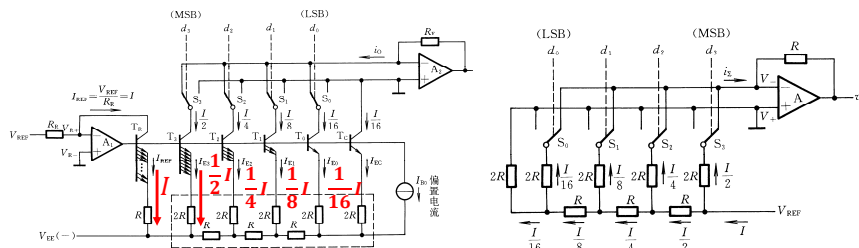
$$i_o = \frac{I}{2}d_3 + \frac{I}{4}d_2 + \frac{I}{8}d_1 + \frac{I}{16}d_0$$

$$v_o = i_o R_F = \frac{R_F I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

$$v_o = \frac{R_F V_{REF}}{2^4 R} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

39

权电流型D/A转换器



$$I_i \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$

38

权电流型D/A转换器

8位数字量输入端

求和电流输出端

正向参考电压Vref
(需加电阻)

$V_{ref} = V_{R+}$

负向参考电压
(一般接地)

正电源输入端

外接补偿电容

负电源输入端

DAC0808电路结构框图

40

权电流型D/A转换器

$$v_o = \frac{R_F V_{REF}}{2^n R} (d_{n-1} 2^{n-1} + \dots + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

$$V_o = \frac{R_F V_{REF}}{2^n R} D_n$$

DAC0808中, $n=8$
 当 $R = R_F$ 时, $V_{REF} = 10V$
 输出电压公式:

$$v_o = \frac{10}{2^8} D_n = \frac{255}{256} \times 10$$

 输出模拟电压的变化范围为 $0 \sim 9.96V$

DAC0808电路结构框图

具有双极性输出的D/A转换器

四、具有双极性输出的D/A转换器

符号位求反
 接一偏置电流
 以二进制补码的形式输入的正、负数转换成正、负极性的模拟电压。

具有双极性输出的D/A转换器

04

具有双极性输出的D/A转换器

1. 将d2取反
2. 将电压偏移4V

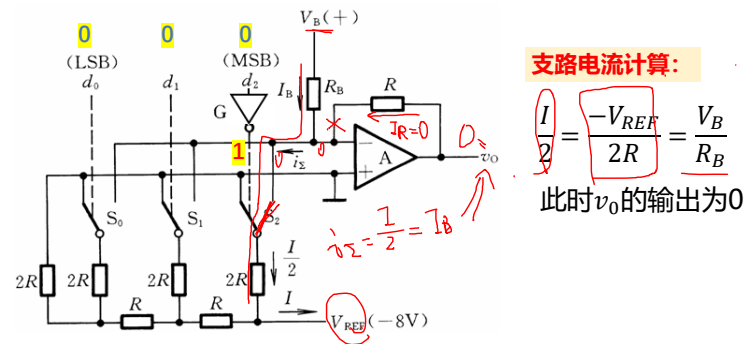
表 8.2.1 输入为3位二进制补码时要求 D/A 转换器的输出

补码输入	对应的十进制数	要求的输出电压
$d_2 d_1 d_0$		
0 1 1	+3	+3 V
0 1 0	+2	+2 V
0 0 1	+1	+1 V
0 0 0	0	0
1 1 1	-1	-1 V
1 1 0	-2	-2 V
1 0 1	-3	-3 V
1 0 0	-4	-4 V

表 8.2.2 具有偏移的 D/A 转换器的输出

绝对值输入	无偏移时的输出	偏移-4 V 后的输出
$d_2 d_1 d_0$		
1 1 1	+7 V	+3 V
1 1 0	+6 V	+2 V
1 0 1	+5 V	+1 V
1 0 0	+4 V	0
0 1 1	+3 V	-1 V
0 1 0	+2 V	-2 V
0 0 1	+1 V	-3 V
0 0 0	0	-4 V

具有双极性输出的D/A转换器

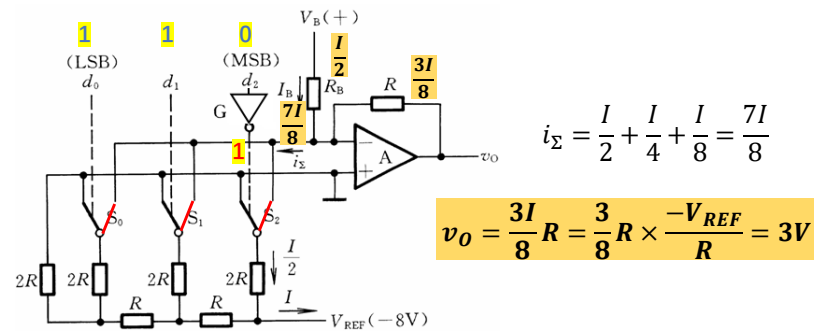


45

8.3

D/A转换器的转换精度与速度

具有双极性输出的D/A转换器



46

D/A转换器的转换精度

1.D/A转换器的转换精度

(1) 分辨率: D/A转换器理论上可达到的精

分辨率可以用输入二进制数码的位数给出。

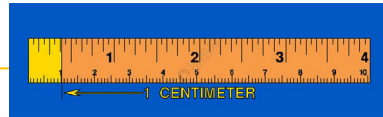
分辨率也可用D/A转换器能够分辨出来的最小输出电压与最大输出电压的比值来表示。10位D/A转换器的分辨率为:

$$\frac{1}{2^{10} - 1} = \frac{1}{1023} \approx 0.001$$



48

D/A转换器的转换精度



(2) **转换误差**：D/A转换器实际上能达到的转换精度。
可以用**输出电压满刻度值的百分数**表示，也可用最低位有效值的倍数表示。

如：转换误差为 0.5LSB ，表示输出模拟电压的绝对误差等于当输入数字量的 $\text{LSB}=1$ (0000...1) 时，其余各位均为0时输出模拟电压的一半。

49

D/A转换器的转换精度

转换误差可分为**静态误差**和**动态误差**。产生静态误差的原因是基准电源不稳定（比例系数误差）、运放的零点漂移（零点漂移误差）、模拟开关导通时的内阻和压降及电阻网络中阻值的偏差等；

理论上静态转换的误差最大可能是以上几种误差的**加和**

动态误差则是在转换的动态过程中产生的附加误差。

51

D/A转换器的转换精度

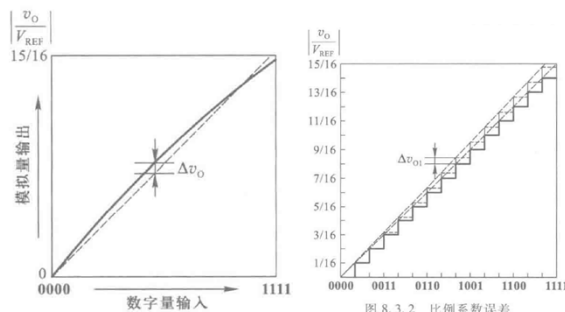


图 8.3.1 D/A 转换器的转换特性曲线

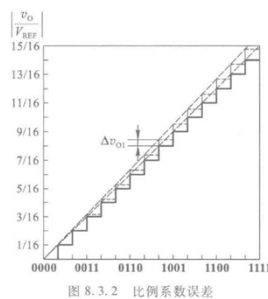


图 8.3.2 比例系数误差

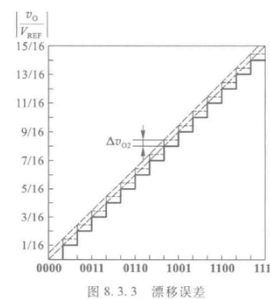


图 8.3.3 漂移误差

50

D/A转换器的转换速度

2.D/A转换器的转换速度

(1) **建立时间 t_{set}** ：指输入数字量各位由全0变为全1或由全1变为全0时，输出电压达到某一规定值所需要的时间。通常建立时间在 100 ns ~ 几十 μs 之间。

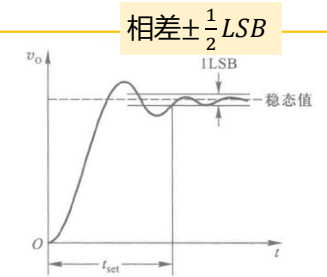


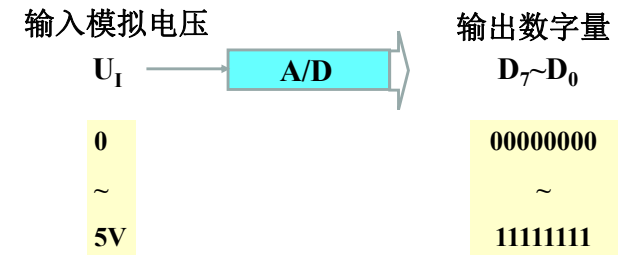
图 8.3.5 D/A 转换器的建立时间

(2) **转换速率 S_R** ：指输入数字量各位由全0变为全1或由全1变为全0时，输出电压的变化率。

52

8.4 A/D转换器

A/D转换器的基本原理



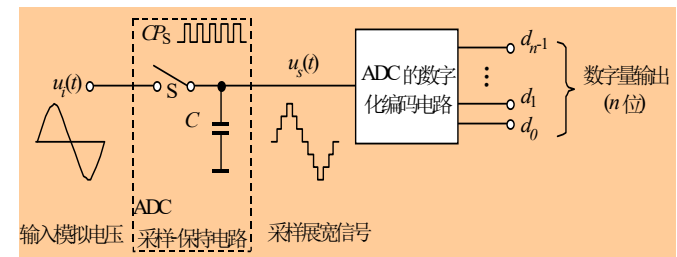
55

01 A/D转换器的基本原理

54

A/D转换器的基本原理

一、A/D转换的基本原理

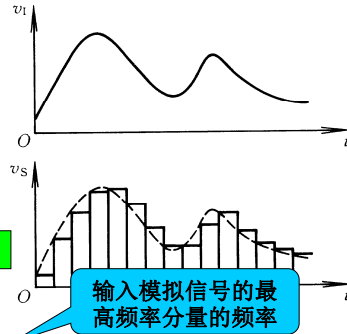


56

A/D转换器的基本原理

取样—保持

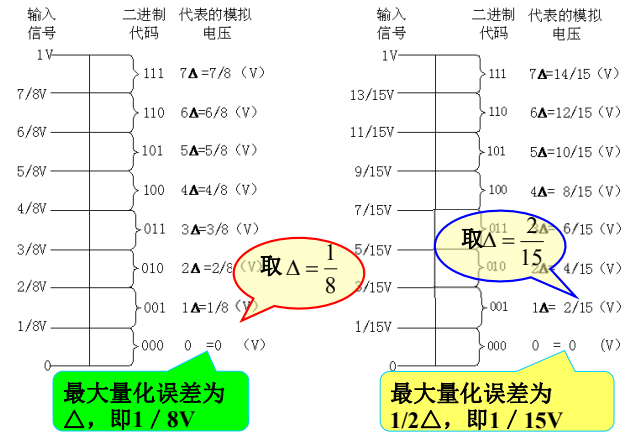
取样是对模拟信号进行周期性地抽取样值的过程,就是把随时间连续变化的信号转换成在时间上断续、在幅度上等于取样时间内模拟信号大小的串脉冲。



取样定理: $f_s \geq 2f_{i(\max)}$

57

A/D转换器的基本原理



59

A/D转换器的基本原理

量化 - 编码

将取样 - 保持电路的输出电压,按某种近似方式归化到与之相应的离散电平上,这一转化过程称为数值量化,简称量化。

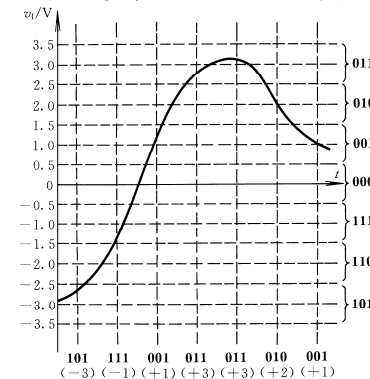
将取样电压表示为一个最小单位的整数倍,所取的最小数量单位称为量化单位,用 Δ 表示。

量化后的数值最后还须通过编码过程用一个代码表示出来,这一过程称为编码。

58

A/D转换器的基本原理

对双极性模拟电压的量化和编码



二进制补码的形式编码

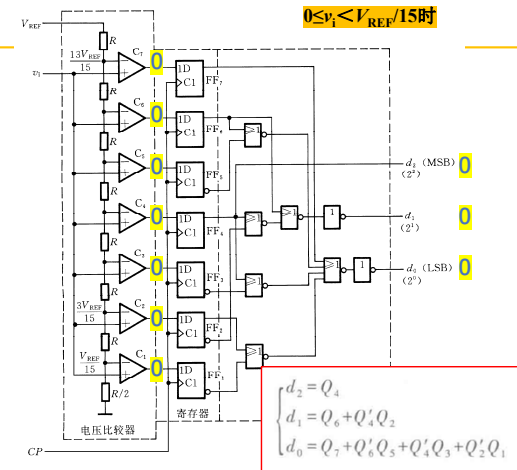
60

02 直接A/D转换器

61

并联比较型A/D转换器

$0 \leq v_i < V_{REF}/15$ 时, 7个比较器输出全为0, CP到来后, 7个触发器都置0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2 d_1 d_0 = 000$ 。



并联比较型A/D转换器

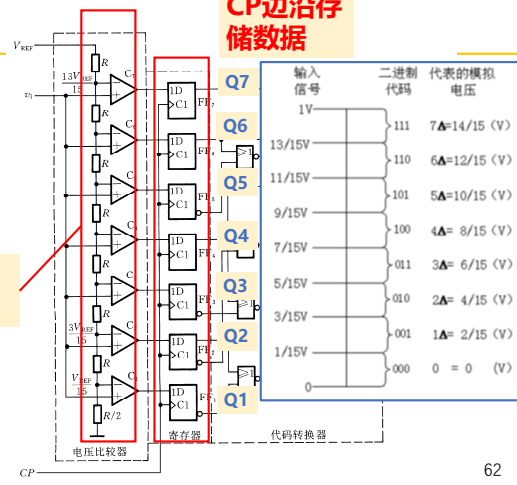
二、直接A/D转换器

并联比较型

数值比较, 确定范围

$$\begin{cases} d_2 = Q_4 \\ d_1 = Q_6 + Q_4'Q_2 \\ d_0 = Q_7 + Q_6'Q_5 + Q_4'Q_3 + Q_2'Q_1 \end{cases}$$

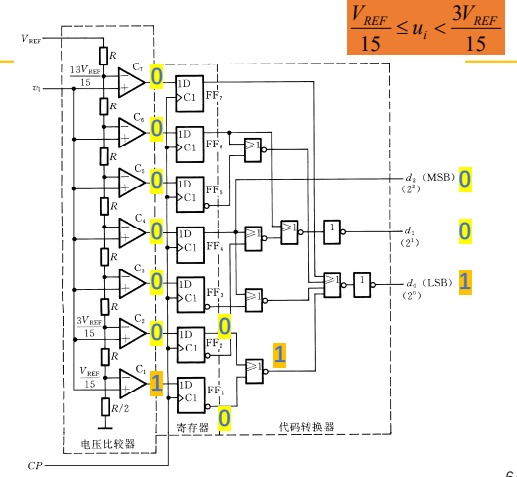
CP边沿存储数据



62

并联比较型A/D转换器

$\frac{V_{REF}}{15} \leq u_i < \frac{3V_{REF}}{15}$ 时, 7个比较器中只有C1输出为1, CP到来后, 只有触发器FF1置1, 其余触发器仍为0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2 d_1 d_0 = 001$ 。

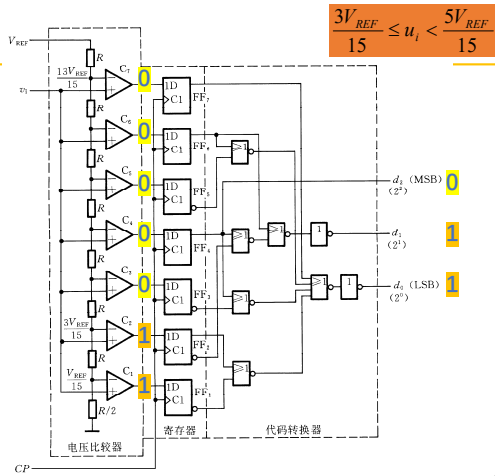


64

并联比较型A/D转换器

$$\frac{3V_{REF}}{15} \leq u_i < \frac{5V_{REF}}{15}$$

时, 比较器中 C_1 、 C_2 输出为1, CP到来后, 触发器 FF_1 、 FF_2 置1, 其余触发器仍为0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2 d_1 d_0 = 011$ 。



65

逐次逼近型A/D转换器

逐次逼近型

工作原理: 可用天平称重过程作比喻来说明。

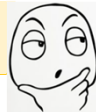
若有四个砝码共重15克, 每个重量分别为8、4、2、1克。设待秤重量 $W_x = 13$ 克, 可以用下表步骤来秤量:

顺序	砝码重	结 论	暂时结果
第一次	8 克	砝码总重 < 待测重量 W_x , 保留	8 克
第二次	4 克	砝码总重 < 待测重量 W_x , 保留	12 克
第三次	2 克	砝码总重 > 待测重量 W_x , 撤除	12 克
第四次	1 克	砝码总重 = 待测重量 W_x , 保留	13 克

67

直接A/D转换器

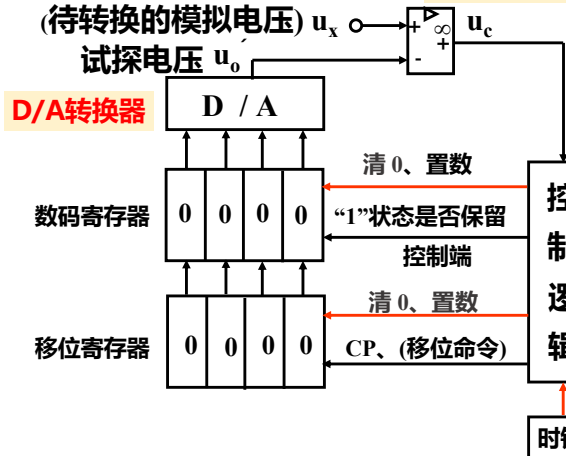
直接A/D转换器的阈值有几个? 为多少?



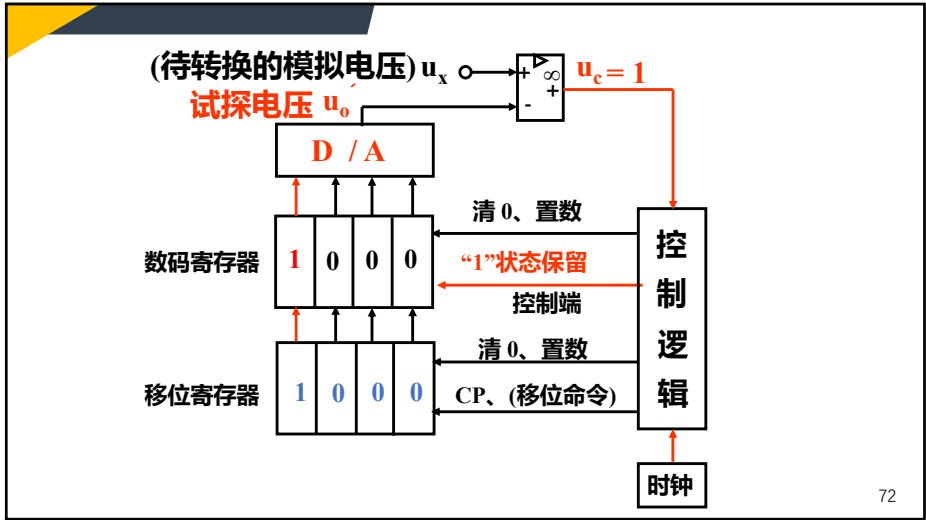
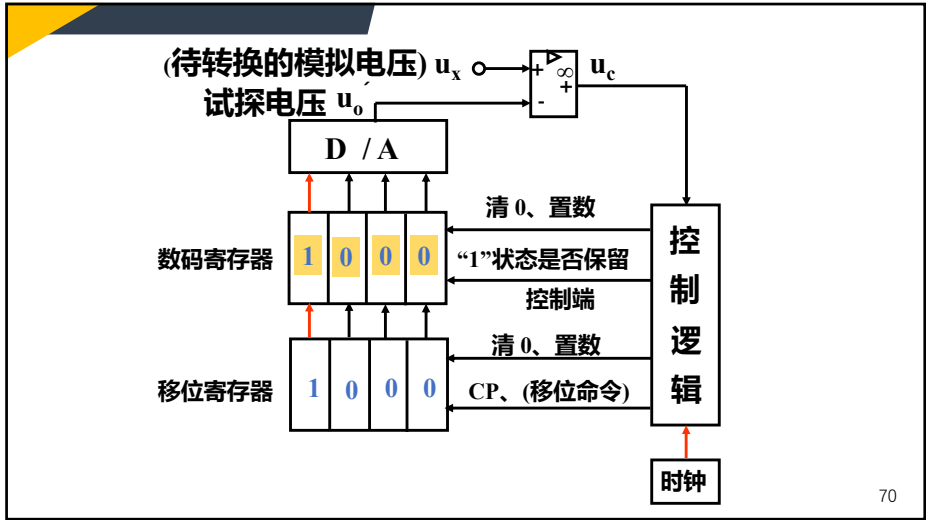
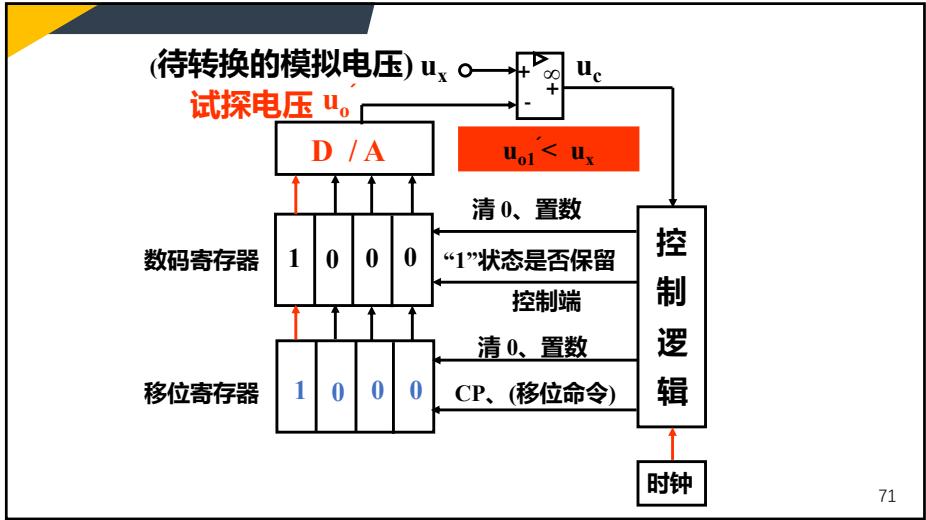
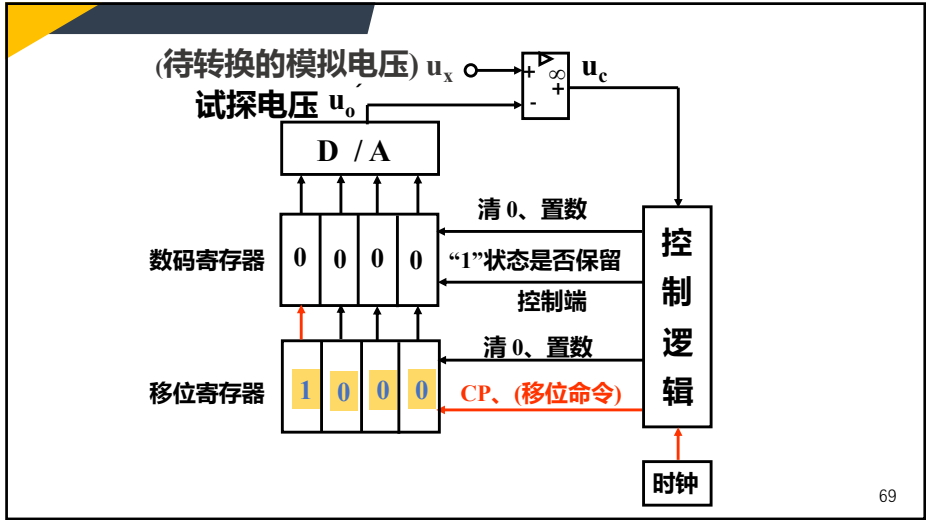
输入模拟电压	寄 存 器 状 态	输出二进制数
u_i	$Q_7 Q_6 Q_5 Q_4 Q_3 Q_2 Q_1$	$d_2 d_1 d_0$
$(0 \sim \frac{1}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0
$(\frac{1}{15} \sim \frac{3}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 0 1	0 0 1
$(\frac{3}{15} \sim \frac{5}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 1 1	0 1 0
$(\frac{5}{15} \sim \frac{7}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 1 1 1	0 1 1
$(\frac{7}{15} \sim \frac{9}{15})V_{REF}$	0 0 0 1 1 1 1	1 0 0
$(\frac{9}{15} \sim \frac{11}{15})V_{REF}$	0 0 1 1 1 1 1	1 0 1
$(\frac{11}{15} \sim \frac{13}{15})V_{REF}$	0 1 1 1 1 1 1	1 1 0
$(\frac{13}{15} \sim 1)V_{REF}$	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1

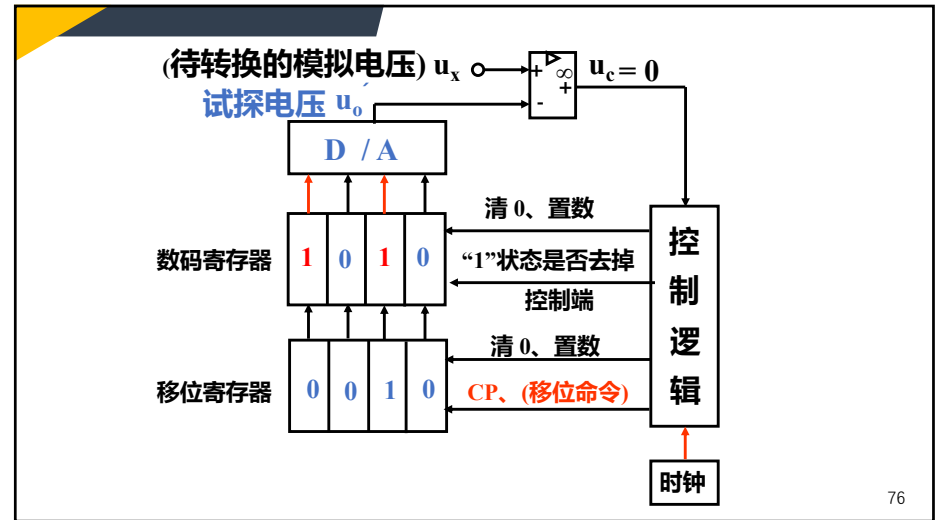
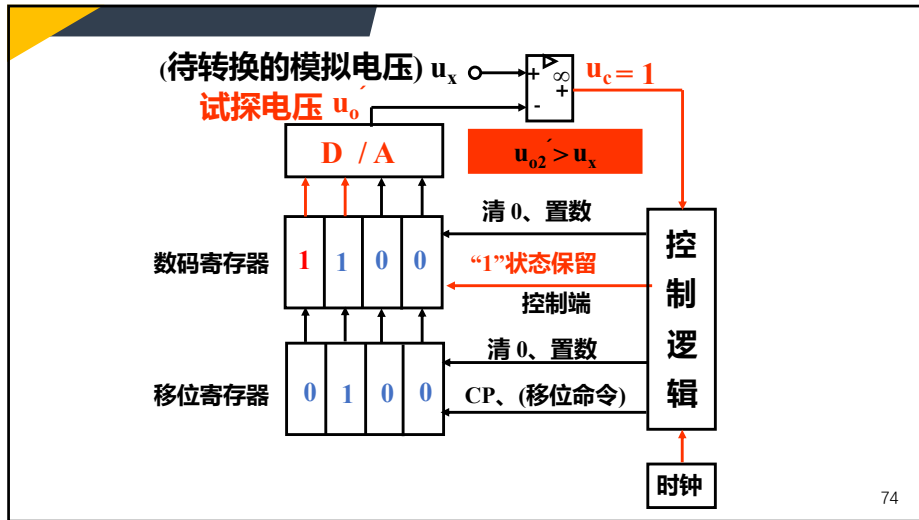
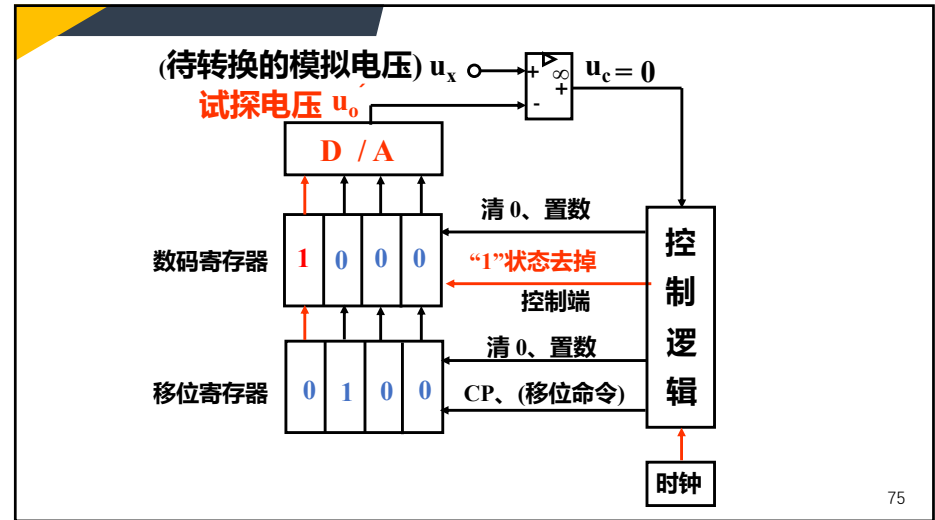
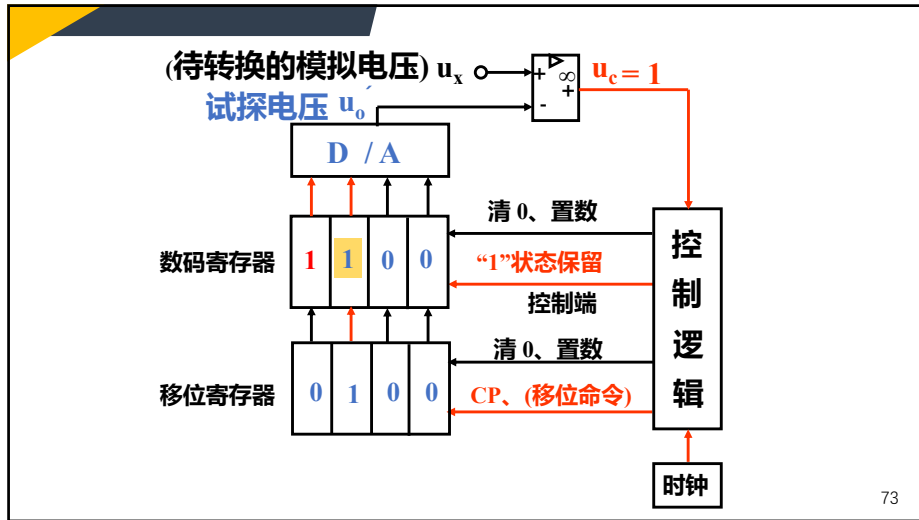
66

电压比较器



68





逐次逼近型A/D转换器

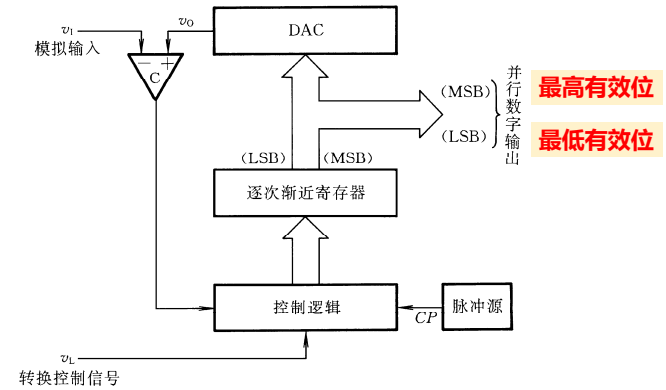
试探电压

待转换电压

逼近次数	移位寄存器 (砵码)	数码寄存器 (逼近值)	比较结果	砵码控制	转换结果
1	1 0 0 0	1 0 0 0	$U_0 < U_x$	保留	1 0 0 0
2	0 1 0 0	1 1 0 0	$U_0 > U_x$	去掉	1 0 0 0
3	0 0 1 0	1 0 1 0	$U_0 < U_x$	保留	1 0 1 0
4	0 0 0 1	1 0 1 1	$U_0 \leq U_x$	保留	1 0 1 1

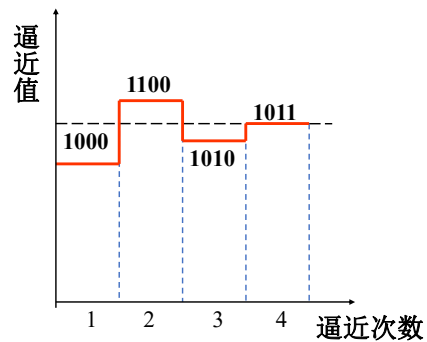
77

逐次逼近型A/D转换器



79

逐次逼近型A/D转换器



78

逐次逼近型A/D转换器

转换开始前先将所有寄存器清零。开始转换以后，时钟脉冲首先将寄存器最高位置成1，使输出数字为100...0。这个数码被D/A转换器转换成相应的模拟电压 u_0 ，送到比较器中与 u_i 进行比较。若 $u_i < u_0$ ，说明数字过大了，故将最高位的1清除；若 $u_i > u_0$ ，说明数字还不够大，应将这一位保留。然后，再按同样的方式将次高位置成1，并且经过比较以后确定这个1是否应该保留。这样逐位比较下去，一直到最低位为止。比较完毕后，寄存器中的状态就是所要求的数字量输出。

80

03 间接A/D转换器

81

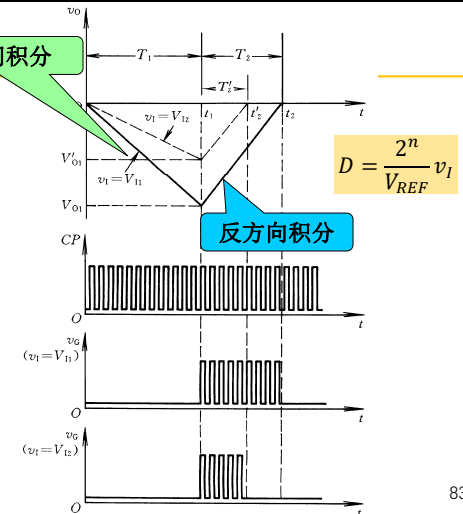
间接A/D转换器

固定时间积分

首先使积分电容C完全放电。

第一步，对输入模拟电压进行固定时间 T_1 积分（ 2^n 个脉冲）；

第二步，对基准电压进行反向积分，使电容放电，放光为止（即 $v_o=0$ ）。对反向放电时间计数，它与输入幅度成正比。

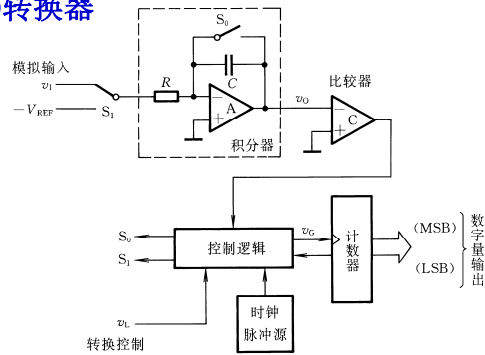


83

间接A/D转换器

三、间接A/D转换器

双积分型



又称为电压—时间变换型（V—T变换型）

82

间接A/D转换器

	转换方式	优缺点
并行ADC	以固定等级的电压比较输入电压，属多层次的比较，一次比较1个字。	转换速度快，但是难以提高分辨率。
逐次逼近ADC	与一组已知电压逐个比较，属多次比较，一次比较1位。	转换速度快，转换时间固定，易与微机接口。
双积分ADC	将输入电压与已知电压转换成脉冲数（即时间）进行比较。	抗工频干扰能力强，易实现高精度转换。

84

04

A/D转换器的主要参数

85

A/D转换器的转换速度

(2) 转换误差

通常以输出误差最大值的形式给出，一般多以最低有效位的倍数给出。有时也用满量程输出的百分数给出转换误差。

2.A/D转换器的转换速度

转换速度是指完成一次转换所需的时间。转换时间是指从接到模拟输入信号开始，到输出端得到稳定的数字输出信号所经过的这段时间。

87

A/D转换器的转换精度

1.A/D转换器的转换精度

(1)分辨率:

A/D转换器的分辨率用输出二进制数的位数表示，位数越多，误差越小，转换精度越高。例如，输入模拟电压的变化范围为0~5V，输出10位二进制数可以分辨的最小模拟电压为 $5V \times 2^{-10} = 4.88mV$ 。

86

本章作业（不用提交）

- 8.2
- 8.3
- 8.8

88



东南大学
SOUTHEAST UNIVERSITY

感谢您的聆听

